

持続可能な人口の原理 成長の限界と人口波動モデル

The Principle of Sustainable Population: Limit of Growth and Population Wave Model

原 俊彦 札幌市立大学(名誉教授)

Toshihiko HARA (Prof.emerit. Sapporo City University)

日時: 2020年11月14日(土) 9:00 ~ 11:30 自由論題A-1「数理・統計」第4報告

座長: 大泉 徹(国立社会保障・人口問題研究所), 稲葉 寿(東京大学)

日本人口学会 第72回大会

場所: 埼玉県立大学(オンライン開催)

はじめに

- 国連推計(中位)(UN 2019)によれば、世界人口は2005年の65.4億人から2015年には73.8億人へ過去10年間で約8.4億人増加。依然、成長は続き、2019年現在の約77億人余りから2030年の85億人へ、さらに2050年には97億人、2100年には109億人まで増加するという。
- 数百万年にわたる人類史全体を俯瞰すれば、このような指数関数的増加が始まったのは、最後の1万年、それも17世紀末頃からであり、地球環境の持続可能性という観点からも成長の限界あるいは終末論的な未来を示唆するものとなっている。
- ここでは人口の波動モデルをもとに、持続可能な人口の原理について考察する。

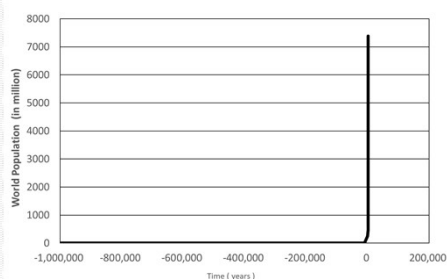
1. 絶滅曲線と指数関数的増加のフラクタル性

絶滅曲線

コーエン(Joel E. Cohen)は『新人口論』(1997)の中で、紀元前100万年から現在までの世界人口の変化をグラフ化し、離陸する飛行機が垂直な壁に沿って急上昇しているような、逆L字型のロングテールな曲線として描いている(図1)。

垂直に近い人口増加後の10万年ほどが空白となっており、この通りであれば、遠からず人類は絶滅し、世界人口は消滅することを示唆していると解釈できる。ここでは、それを絶滅曲線と呼ぶ。

図1 コーエン(Joel E. Cohen)の絶滅曲線



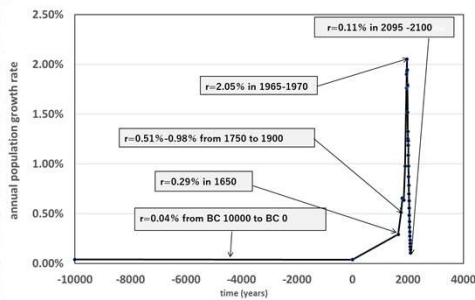
注: Cohen (1998)の図Xを参考に国立社会保障・人口問題研究所(2019)の表1-9 世界人口の推移と推計: 紀元前~2100を元に作図。横軸に紀元前100万年から紀元後20万年、縦軸を0から80億人とし、両軸とも対数化せず。

過去1.2万年の人口成長率の推移

このような指数関数的増加が始まったのは、最後の1.2万年、それも17世紀末頃からであり、世界人口の成長率(図2)は以下のように試算される。

- $r=0.04\%$ (BC 10000 - BC 0) 狩猟採集社会
- $r=0.29\%$ (1650年頃) 農耕社会
- $r=0.51\%-0.98\%$ (1750年 - 1900年頃) 産業社会
- $r=2.05\%$ (1965年-1970年) 人口爆発
- $r=0.11\%$ in 2095 -2100 人口成長の終焉

図2 過去1.2万年の人口成長率の推移

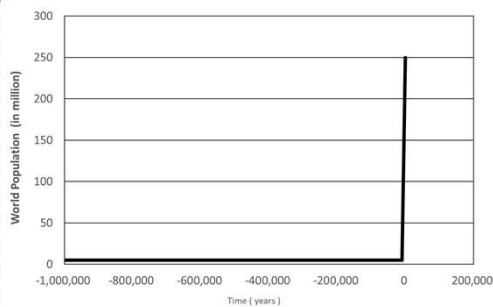


注：国立社会保障・人口問題研究所（2019）の表1-9 世界人口の推移と推計：紀元前～2100を元に算定

指数関数的増加のフラクタル性

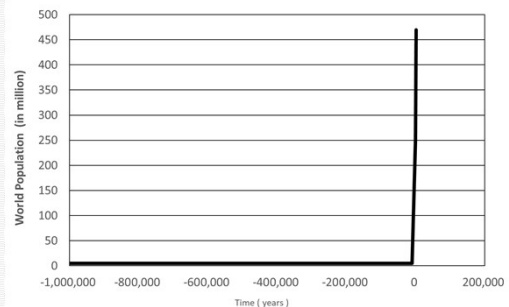
- 確かに絶滅曲線は指数関数的増加の爆発的性質を示すものではあるが、実は過去の1.2万年のどの時点においても、コーエンと同じ形を描くことができる。
- つまり人口が指数関数的に増加する限り、初期値と直近値の間に十分な時間的距離を取り作図すれば、常に逆L字型のロングテールな曲線となる（図3・図4）。
- これは人口に限らず指数関数的増加の曲線にフラクタル性（どこを取っても同じ形になる）があるためと考えられる。

図3 紀元0年の絶滅曲線



注：形は図1にはほぼ相似するが、上限が2億5千万人ほどであったと推計されている。

図4 紀元1650年頃の絶滅曲線



注：形は図1にはほぼ相似するが、上限が4億7千万人ほどであったと推計されている。

2.人口波動モデルのフラクタル性

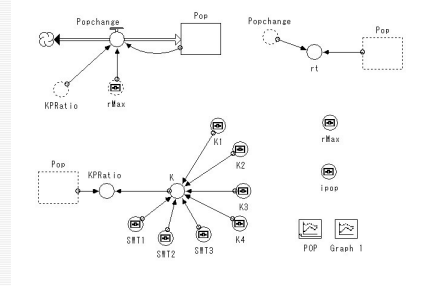
指数関数的増加のダブリングタイム

- マルサスが「幾何級数的」と形容した指数関数的増加のダブリングタイムは年率1%で約72年、2%で35年ほどであり、1960年代の人口爆発の2.05%（1965-70年）（図2）の元では世界人口は約35年（おおよそ一世代）毎に倍増する状況にあったことがわかる。
- しかし、このような爆発的な人口増加は人類史的な時間スケールで見れば一瞬の出来事であり、指数関数的増加は遠からず成長の限界に直面し、成長率は0%に漸近し人口増加は収束する（図2）。

人口波動モデル

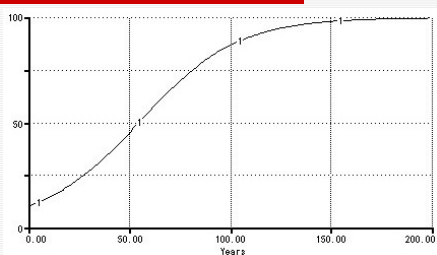
- 持続可能な人口は成長(ロジスティック)曲線を描く。指数関数的増加の爆発的性質から人口増加は短期間しか続き得ない。また歴史的にも世界人口の増加はエポックごとに関わると思われ、この成長曲線は1つではなく複数の曲線が連続したものであると考えられる。
- 人口、人口成長率、成長限界からなる簡単なロジスティックモデルを作成(図5)し、一定の時間間隔で成長限界が10倍に増加するシナリオのシミュレーションを行った。
- 結果は、ロジスティック曲線が多段階で連なる人口成長カーブとなった(図6・7・8・9)。

図5 多段階の人口波動モデル



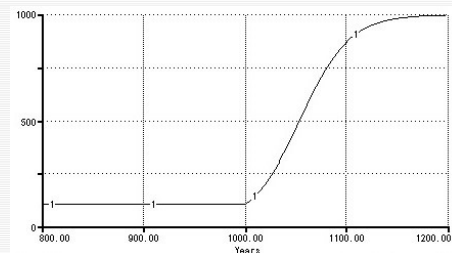
注: Stella Vers. 8.1.11による。SWT (スイッチタイム) で時間を指定し、K (環境限界) まで成長し減衰し、次の波が起きる。

図6 第1波 (0年から200年: 上限100人)



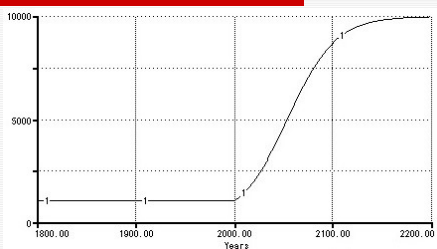
Wave 1: at start time (ST 0), the total population is set to 10 persons. It increases to K1 (100 persons) at around 150 years and stagnates. (Hara 2020)

図7 第2波 (800年から1200年: 上限1000人)



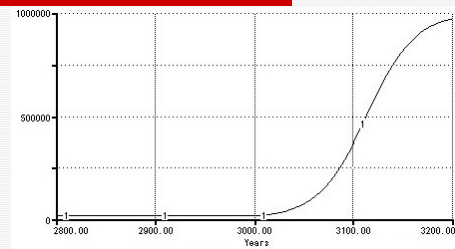
Wave 2: after SWT1 (ST1000), K1 is switched to K2 (1,000 persons). The limit of population allowance becomes ten times more as much as K1. Then, the next logistic curve begins and reaches 1,000 persons at around 1,200 years and stagnates. (Hara 2020)

図8 第3波 (1800年から2200年: 上限10000人)



Wave 3: after SWT2 (ST 2000), K2 is switched to K3 (10,000 persons). The population allowance becomes 10 times more as much as K2. Then, the wave starts and reaches 10,000 persons at around 2,200 years and stagnates. (Hara 2020)

図9 第4波 (2800年から3200年: 上限1000000人)

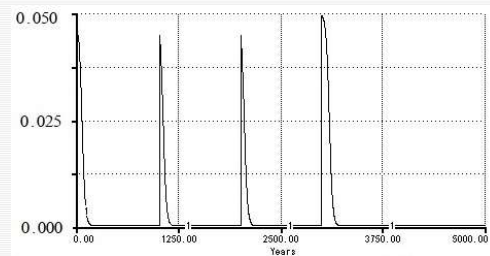


Wave 4: after SWT3 (ST3000), K3 is switched to K4 (1,000,000 persons). The limit of population allowance becomes 100 times more as much as K3. The last wave starts and reaches one million at around 3,200 years and stagnates. (Hara 2020)

人口波動モデルのフラクタル性

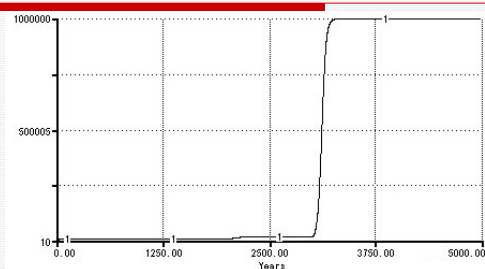
- このロジスティック曲線が多段階で連なる人口成長カーブは、成長率が各段階でパルス状に跳ね上がるが短期間に収束(図10)し、全体としては、また1つのロジスティック曲線を描く(図11)。
- つまり、連続するロジスティック曲線にも指数関数的増加と同じようなフラクタル性がある。
- また成長限界への収束後の期間が十分短い(あるいは全体の観察期が十分に長い)場合、成長曲線は指数関数的増加の曲線と区別が付かない(絶滅曲線になる)。

図10 人口成長率のパルス状の変化



The population growth rate at time t ($r(t)$) rises from 0 to 5% and shrinks to 0% in spike-like four times, every 1000 years. (Hara 2020)

図11 全体としての波 (0年から5000年まで)



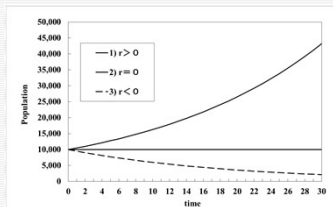
The most interesting thing is that a series of four waves in multistage result in a single logistic curve from a long-time perspective.. (Hara 2020)

3.持続可能な人口の原理

人口波動と人口の持続可能性

- 人口は指数関数的に増加する(図12)ため、成長率が0かマイナスでない限り、短期間に(図13)成長限界に近づく。
- このため人口はロジスティック曲線を描き、人口成長率は0に近づく(図14)。
- 成長限界が外れるか上昇すれば、次の成長に移行する(図6・7・8・9)。
- つまり、人口(変動)は複数の波動の連続ないしは集合であり、このような運動は大きな歴史的エポックだけでなく、部分的・地域的には常に起きていて考えられる。
- これが人口の持続可能性を生み出しているといえる。

図12 指数関数的成長と縮減



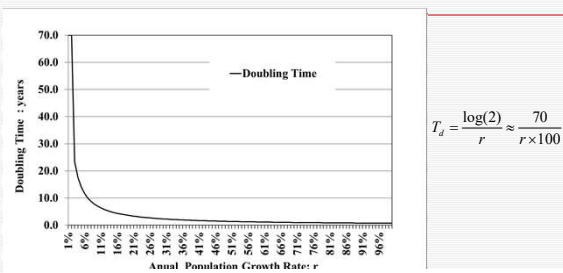
$$N_t = N_0 e^{rt}$$

$$\frac{dN}{dt} = rN$$

- (1) Population increases exponentially (i.e. in a geometrical ratio) if the growth rate is positive ($r > 0$).
- (2) Population is stationary if the growth rate is zero ($r = 0$).
- (3) Population decreases exponentially (i.e. in a geometrical ratio) and reaches a minimum (0) at the infinite position, if the growth rate is negative ($r < 0$).

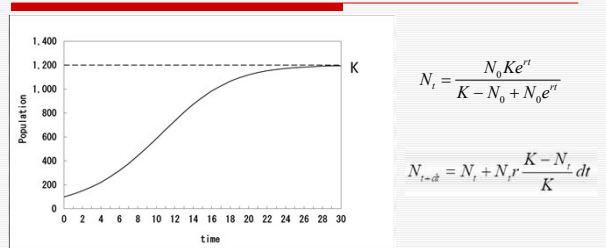
(Hara 2020)

図13 指数関数的成長・縮減のダブリングタイム



The doubling time is the same length for a decaying population. In this case, instead of "a doubling time", the notion of "half-life (halving time)" is applied. The term "half-life" is rarely used in demography but very popular in archeology and atom physics to express a lifetime of the radioisotope. (Hara 2020)

図14 ロジスティック曲線と成長限界

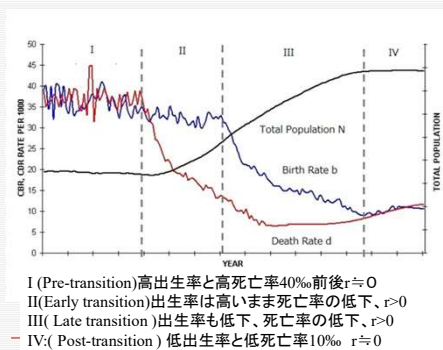


It is difficult to predict the level of K in the case of human beings. It is because K is not fixed a priori but relatively changed according to the adaptation capacity of the human being. (Hara 2020)

直近の人口波動としての人口転換

- 人口転換: 前産業社会の多産多死からポスト産業社会の少産少死へと移行する歴史のプロセス (Frank W. Notestein 1945) (図15)
- 歴史的タイミングやスピードは国ごとに異なるが、人口成長率=出生率-死亡率 ($r=b-d$) が0に漸近してゆく点は共通している。
- 直近の人口転換は歴史的な人口波動の1つであり、比較的短期の無数の人口波動の集合と見なすことができる。
- ただし、このプロセスは自動的に進行するものではなく、与件としての社会・経済・文化的要因の影響を受ける。
- また定常状態への移行も必然でなく、環境限界を越えてオーバーシュートするか、置換水準以下の出生力が続く場合には持続可能性が失われる。

図15 人口転換モデル



マルサスの「人口の原理」(1798年)

- 私は二個の公準 (ポスチュラータ) を置くことが当然ゆるされると考える。
 - 第一、食物は人類の生存に必要である。
 - 第二、両性間の情慾は必ずあり、だいたい今のままで変わらない。
- 人口の増加力は人類のための生活資料 (substance) を生産すべき土地の力 (power in the earth) よりも不定に (indefinit) に大きいと主張する。
- 人口は制限 (check) せられなければ幾何級数的 (geometrical ratio) に増大する。生活資料は算術級数的 (arithmetical ratio) にしか増大しない。
- 多少とも数学のことを知っている人ならば、前者の力が後者のそれに比してどれほど大きい、それはすぐわかるだろう。(マルサス 1950)
- 人口は指数関数的増加し、 $r > 0$ が続けば遠からずオーバーシュートする。

持続可能な人口の原理 (Hara 2020)

1. I may fairly make three postulates, First, that human is mortal. Secondly, that the maximum number of childbearing is limited in a lifetime, and that the limits of growth exists a posteriori.
2. Under these three conditions, the birth rate and the death rate should be balanced to 0 for a sustainable population.
3. The population, when unchecked to be deviated from the replacement level of fertility at a given life expectancy, confronts increasing socio-economic cost and a loss of its sustainability.

まとめと考察 その1

1. 人口は指数関数的に変動する: $r > 0$ 増加, $r = 0$ 定常, $r < 0$ 減少
2. ダブリングタイムは $r = \pm 2\%$ で約35年(1世代)であり、短期間で成長限界をオーバーシュートまたは縮減消滅するリスクが高まる。
3. 人口は長期的にはロジスティック曲線を描いて定常状態(成長限界)に漸近し、成長率が $r = 0$ の定常状態に収束する場合にのみ持続可能性を持つ。ただし、定常状態(成長限界)の水準は常に事後的に決まる。
4. 人口(変動)は複数の波動の連続ないしは集合であり、このような運動は大きな歴史のエポックのみでなく、部分的・地域的には常に起きている。このような波動の連続が全体としての持続可能性を生み出している。
5. 連続するロジスティック曲線にも指数関数的増加と同じようなフラクタル性があり、収束期間が十分短い(あるいは観察期が十分に長い)場合、1つの指数関数的増加のカーブと区別が付かない絶滅曲線を示す。
6. 時間軸を十分長くすれば、その時点で持続している人口は常に絶滅曲線を描く(平均成長率は限りなく0に近いプラス)。

31

まとめと考察 その2

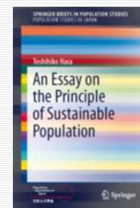
7. 直近の人口転換(前産業社会の多産多死からポスト産業社会の少産少死への移行)は歴史的な人口波動の1つであり、比較的短期の無数の人口波動の集合と見なすことができる。
8. ただし、このプロセスは自動的に進行するものではなく、与件としての社会・経済・文化的要因の影響を受ける。
9. また定常状態への移行も必然ではなく、環境限界を越えてオーバーシュートするか、置換水準以下の出生力が続く場合には持続可能性を失う。
10. 従って、数世代のうちに $r = b - d$ を0に近づけるとともに、それにあわせ与件としての社会・経済・文化システムを再デザインすることが必要とされている。

32

参考文献・謝辞

ロバート・マルサス(1950) 高野岩三郎／大内兵衛訳、「初版 人口の原理」、岩波文庫
ジョエル・E. コーエン (1998) 『新「人口論」—生態学のアプローチ』農山漁村文化協会
(Cohen, J.E.: 1995, How Many People can The Earth Support?, New York, W.W. Norton.)
原俊彦 (2001) 『狩猟採集から農耕社会へ—先史時代ワールドモデルの構築』(情報考古シリーズ) 勉誠出版
Hara T (2014) A Shrinking Society: Post-Demographic Transition, in Series: SpringerBriefs in Population Studies Subseries: Population Studies of Japan, (<https://www.springer.com/gp/book/9789811336539>), Springer
Hara, T(2020) An Essay on the Principle of Sustainable Population, in Series: SpringerBriefs in Population Studies Subseries: Population Studies of Japan, (<https://www.springer.com/gp/book/9789811336539>), Springer
IPSS (2017) Population statistics of Japan 2017. www.ipss.go.jp/p-info/e/psj2017/PSJ2017.asp. Accessed 19 Dec 2018
United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019a) World Population Prospects: The 2019 revision [Database]. Retrieved from (Note: All projections are based on the UN's Medium Fertility Variant Projections). <https://population.un.org/wpp/>

*本研究は科学研究費補助金「人口転換の現代的解析に基づく新たな人口潮流とライフコース変動に関する総合的研究」(平成26~28年度) 研究代表者: 金子隆一(国立社会保障・人口問題研究所) によるものである。



連絡先: 原 俊彦 (はら としひこ) 札幌市立大学 (名誉教授)
(自宅) : 〒007-0834 札幌市東区北34条東19丁目3-7
電話 090-2077-6027 E-mail : t.hara@scu.ac.jp, <http://toshi-hara.jp>